Jean BECQUEREL
Professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle,
Examinateur des Élèves à l'École Polytechnique,
Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

L'ART MUSICAL DANS SES RAPPORTS AVEC LA PHYSIQUE

Extrait du Tome II du Cours de Physique.

PARIS
LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE J. HERMANN
6, RUE DE LA SORBONNE, 6

1926

L'ART MUSICAL DANS SES RAPPORTS AVEC LA PHYSIQUE (1)

INTERVALLE DE DEUX SONS

L'expérience montre que la sensation éprouvée à l'audition simultanée ou successive de deux sons $N_1 N_2$ présente une certaine qualité (2) qui ne change pas si l'on fait varier les hauteurs de ces sons en maintenant constant leur rapport $\frac{N_2}{N_1}$.

D'après cette loi, il est naturel d'appeler *intervalle* de deux sons le rapport de leurs hauteurs

$$i = \frac{N_2}{N_1}.$$

Soient trois sons $N_1 < N_2 < N_3$; les musiciens disent que l'intervalle de N_1 à N_3 est la somme des intervalles de N_1 à N_2 et de N_2 à N_3 : leur intuition les a donc conduits à mesurer les intervalles par leurs logarithmes. De manière à avoir une unité de l'ordre de grandeur du plus petit intervalle généralement appréciable à l'oreille, les

(1) On ne saurait trop recommander, en particulier aux musiciens, de lire le livre d'Helmholtz : *Théorie physiologique de la musique* (traduction française par Guéroult, 1874). Cet admirable ouvrage doit ses qualités au fait que l'auteur, à la fois physicien de génie et physiologiste, était en même temps un philosophe et un artiste.

Un excellent exposé des théories d'Helmholtz se trouve dans l'ouvrage (beaucoup plus restreint) de M. Bouasse, *Bases physiques de la musique* (collection *Scientia,* Gauthier-Villars, 1906).

(2) On dit souvent que l'impression ressentie à l'audition de deux sons « ne dépend que » du rapport de leurs hauteurs. Cette manière de s'exprimer est incorrecte : une bonne oreille reconnaît la hauteur absolue d'un son ; de plus, les battements ou les sons résultants, qui jouent un rôle fondamental dans l'impression éprouvée, dépendent de la différence et non du rapport des hauteurs.

physiciens ont fait la convention de prendre pour mesure d'un intervalle son logarithme vulgaire multiplié par 1 000. L'unité est appelée *savart*. On écrit

$$S = 1000 \log . i ;$$

par exemple l'intervalle $i = 2$ est représenté par 301,03 savarts, le logarithme de 2 étant 0,30103.

Dans une mélodie, c'est-à-dire lorsque des notes sont émises successivement, les fractions de savart sont absolument négligeables.

L'art musical a nécessité la définition de degrés discontinus dans l'échelle continue des sons. Il est très remarquable que les divisions de l'échelle des sons aient été sensiblement les mêmes chez les divers peuples et depuis des temps très reculés : ce fait montre qu'il y a peu d'arbitraire dans la classification des sons et le choix des intervalles. Ici, nous devons examiner la question au point de vue du physicien, c'est-à-dire chercher dans les lois de l'acoustique les raisons profondes de l'emploi des intervalles que les musiciens ont adoptés.

UNISSON. OCTAVE. INTERVALLES RENVERSÉS

L'oreille reconnaît très bien l'égalité des hauteurs de deux sons émis successivement, et plus rigoureusement encore si les sons sont simultanés ; dans ce dernier cas, en effet, l'appréciation de l'unisson est rendue parfaite par la disparition des battements.

Deux sons dont les hauteurs sont dans le rapport de 1 à 2 sont dits à l'*octave* l'un de l'autre. Cet intervalle s'apprécie également très bien dans le cas de deux sons successifs, et avec une grande précision lorsque les sons se trouvent émis ensemble, car ici encore les battements (1) disparaissent lorsque l'octave est exactement réalisée.

C'est un fait (dont nous verrons plus loin la raison) que l'oreille trouve une grande ressemblance entre deux sons à l'octave. Un *accord* (ensemble de sons simultanés) et le même accord répété à l'octave du premier, non seulement ont la qualité commune à tous les accords composés des mêmes intervalles, mais offrent une parenté considérablement plus grande ; sans doute ces accords ne sont pas identiques,

(1) Nous avons montré paragraphe 87 que lorsqu'un son est voisin de l'octave d'un autre, le son résultant bat avec le son le plus grave. De plus les harmoniques, en général présents, donnent aussi des battements (par exemple battements entre le fondamental le plus aigu et le premier harmonique du plus grave).

puisque les fréquences des sons sont multipliées par 2 $\left(\text{ou par } \frac{1}{2}\right)$, mais ils ont une telle analogie que l'on peut presque considérer l'un comme la répétition de l'autre.

Cette quasi-équivalence entre sons à l'octave conduit à faire passer un son à une ou même plusieurs octaves au-dessus ou au-dessous. Soit alors un accord de deux notes ; on peut, par une telle opération, remplacer les sons par deux autres qui se trouvent compris entre deux limites données dont l'intervalle soit une octave.

Lorsque, par des transports à l'octave, le son primitivement le plus aigu est devenu le plus grave, on dit que l'accord a été *renversé*. Par exemple, prenons l'intervalle $\frac{3}{2}$ (appelé *quinte juste*), abaissons d'une octave le son supérieur ou élevons d'une octave le son inférieur, nous obtenons un rapport $\frac{4}{3}$ (*quarte juste*) ; la quarte et la quinte sont le renversement l'une de l'autre. Ces deux intervalles ne sont donc pas étrangers l'un à l'autre (1) : ils sont complémentaires, en ce sens que leur somme forme une octave

$$\log \frac{3}{2} + \log \frac{4}{3} = \log 2.$$

GAMME A TEMPÉRAMENT ÉGAL

D'après ce qui vient d'être dit, on peut se borner à définir une échelle discontinue de sons dans un intervalle d'une octave ou 301,03 savarts ; les autres sons s'obtiendront en répétant la même division avec transport d'un nombre entier d'octaves.

La division la plus simple consiste à partager l'octave en un nombre donné d'intervalles égaux ; on en a pris douze ; chacun de ces intervalles (25,09 savarts) est appelé *demi-ton tempéré* et une telle échelle est *la gamme chromatique à tempérament égal* ou *bien tempérée*.

Les notes de la gamme portent sept noms différents auxquels correspondent les touches blanches du piano ; les touches noires correspondent aux cinq autres notes dont chacune peut être considérée comme la note précédente (touche blanche) élevée d'un demi-ton (signe ♯ ou *dièze*), ou comme la note suivante abaissée d'un demi-ton

(1) La quarte est un accord un peu moins *consonant* que la quinte, cela provient de la situation relative des divers sons partiels (harmoniques) ainsi que des sons différentiels (voir plus loin § 98).

(signe ♭ ou *bémol*). Nous indiquons en savarts les intervalles comptés à partir de l'*ut*, mais bien que nous ayons gardé deux décimales il ne faut pas oublier que, tout au moins dans le cas de sons émis successivement (1), *deux sons distants d'une fraction de savart ne sont pas différenciés par l'oreille.*

(10-1)

ut	*ut*♯, *ré*♭	*ré*	*ré*♯, *mi*♭	*mi*	*fa*	*fa*♯ *sol*♭
0	25,09	50,17	75,26	100,34	125,43	150,51
sol	*sol*♯, *la*♭	*la*	*la*♯, *si*♭	*si*	*ut*	
175,60	200,69	225,77	250,86	275,95	301,03	

mi se confond avec *fa*♭, *fa* avec *mi*♯, *si* avec *ut*♭, *ut* avec *si*♯.

La gamme se reproduit ensuite ; les diverses octaves sont spécifiées par un indice. Au point de vue de la hauteur absolue on a pris conventionnellement pour *la normal* (le *la* du milieu du clavier de piano) un son faisant 435 vibrations par seconde ; on lui a donné, ainsi qu'aux notes de la même octave, l'indice 3. Les sons utilisés dans l'orgue vont de ut_0 (32,3 vibrations) à ut_8 (8277 vibrations), et dans le piano de la_{-1} (27,2) à la_6 (3480).

La *gamme majeure tempérée* est constituée par la série des intervalles

(10-2) 1 ton 1 ton 1/2 ton 1 ton 1 ton 1 ton 1/2 ton

par exemple

ut ré mi fa sol la si ut.....

La première note est dite *tonique*. Il est clair qu'on peut prendre pour tonique l'une quelconque des douze notes (10-1), ce qui donne douze *transpositions* (1) qui, avec la gamme à tempérament égal,

(1) On a tort, à mon avis, de dire quelquefois que les fractions de savart sont *toujours* négligeables. Il n'en est pas ainsi dans le cas de deux sons extrêmement voisins suffisamment aigus, émis simultanément, et *bien tenus* (orgue) ; par exemple les sons dont les nombres de vibrations sont 1000 et 1001 donnent 1 battement par seconde ; leur intervalle n'est pourtant que de 0,43 savart.

(2) En l'année 1700 le *la* normal était pris faisant 405 vibrations. On a peu à peu modifié la convention. Il eut été plus simple de choisir l'échelle dite « des physiciens » d'après laquelle les différents *ut* sont des puissances exactes de 2, avec $ut_0 = 32$; cela donne $la_3 = 430,5$ pour la gamme tempérée.

(3) Souvent même les grandes orgues ont un jeu qui débute à ut_{-1} (16,15 vibrations, tuyau ouvert de 32 pieds ou tuyau bouché de 16 pieds) ; mais les sons de l'octave d'indice -1 n'ont de caractère musical que par leurs harmoniques, et d'ailleurs ne s'emploient pas isolément ; les sons fondamentaux se perçoivent sous forme de roulement.

(4) On emploie encore le terme *moduler* au lieu du mot *transposer*. Ce terme prête à confusion, car le « mode » est caractérisé par le choix des intervalles à partir de la tonique et non par la hauteur absolue de celle-ci.

n'introduisent pas d'autres sons que ceux définis plus haut ; par exemple, dans le ton de *ré*, la gamme majeure devient

ré mi fa♯ sol la si ut♯ ré.

ÉCHELLE DE SONS PAR QUINTES JUSTES. GAMME DE PYTHAGORE

Nous avons indiqué d'abord la gamme dite à tempérament égal à cause de la manière simple dont elle est formée et parce que, étant adoptée sur le piano, elle est familière à tout le monde. Nous verrons bientôt qu'elle a été introduite en musique par la nécessité *pratique* pour les instruments à sons fixes (orgue, piano) de ne conserver qu'un nombre assez restreint de sons dans une octave ; mais il est impossible de justifier cette gamme par une parenté existant (d'une manière rigoureuse) entre les divers sons qui la constituent.

Nous devons donc chercher à établir une gamme « naturelle » dont les divers sons n'apparaissent plus comme étrangers les uns aux autres.

Pythagore a imaginé une échelle de sons procédant par quintes et octaves, et ce système a été très en faveur jusqu'à Zarlin, au seizième siècle. Pythagore savait qu'en prenant les $\frac{2}{3}$ d'une corde vibrante, on obtient un son qui forme avec le son donné par la corde entière un intervalle très consonant à l'oreille : cet intervalle de quinte est celui que l'oreille apprécie le plus exactement après l'octave, et en fait les instruments s'accordent par quintes successives. De plus, la simplicité du rapport de 3 à 2, le plus simple qu'on puisse réaliser avec deux sons compris dans une même octave, était de nature à frapper l'esprit des anciens qui attribuaient aux nombres une signification quelque peu mystique.

Pythagore n'a retenu comme intervalles naturels que l'octave et la quinte. Adoptons pour le moment cette théorie ; partons d'une note fondamentale ou tonique que nous appellerons ut_1, et montons de cinq quintes successives nous obtenons des sons que nous appellerons

$$ut_1 \quad sol_1 \quad ré_2 \quad la_2 \quad mi_3 \quad si_3\,;$$

(10-3) intervalles successifs $\quad \frac{3}{2} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{3}{2}$

portons maintenant une quinte au-dessous de ut_1, nous obtenons une septième note fa_0.

Par transports d'octaves, ramenons les sons dans l'octave $ut_1 - ut_2$, et rangeons les notes par hauteurs croissantes, il vient

(10-4)

	ut_1		$ré_1$		mi_1		fa_1		sol_1		la_1		si_1		ut_2
Rapports avec ut_1	1		$\left(\frac{3}{2}\right)^2 \frac{1}{2}$		$\left(\frac{3}{2}\right)^4 \frac{1}{2^2}$		$\frac{2}{3}\,2$		$\frac{3}{2}$		$\left(\frac{3}{2}\right)^3 \frac{1}{2}$		$\left(\frac{3}{2}\right)^5 \frac{1}{2^2}$		2
	1		$\frac{9}{8}$		$\frac{81}{64}$		$\frac{4}{3}$		$\frac{3}{2}$		$\frac{27}{16}$		$\frac{243}{128}$		2
Intervalles avec ut_1, en savarts	0		51,15		102,30		124,94		176,09		227,24		278,39		301,03
Rapports entre notes voisines		$\frac{9}{8}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{256}{243}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{256}{243}$	
Intervalles successifs en savarts		51,15		51,15		22,64		51,15		51,15		51,15		22,64	

Telle est la gamme diatonique à sept sons de Pythagore. On voit que l'intervalle de $\frac{9}{8}$ ou 51,15 savarts qui sépare la quinte juste ou *harmonique* de son renversement, la quarte harmonique, se retrouve entre *ut* et *ré*, *ré* et *mi*, *fa* et *sol*, *sol* et *la*, *la* et *si*. Cet intervalle se nomme *ton majeur harmonique*.

Le *demi-ton pythagoricien* ou *limma*, de 22,64 savarts, sépare *mi* et *fa* et se retrouve à la fin de l'octave.

La comparaison avec (10-1) montre que la gamme tempérée ne diffère pas beaucoup de la gamme pythagoricienne. La quinte tempérée (157,60 S) ne s'écarte de la quinte juste harmonique que de 1/2 savart, et il en est de même pour les quartes tempérée et harmonique. Cependant, le limma est notablement inférieur au demi-ton tempéré (différence de 2 1/2 savarts) et des écarts sensibles entre les deux gammes se manifestent pour la sixte (*ut-la*), la tierce (*ut-mi*) et la septième (*ut-si*).

La gamme pythagoricienne à 7 sons a été complétée par l'addition de notes intermédiaires, dièzes et bémols, en procédant toujours par quintes justes (1) ; en s'élevant successivement jusqu'à la douzième quinte à partir d'*ut*, et ramenant toujours les sons dans la même octave, on obtient après le *si* (5e quinte)

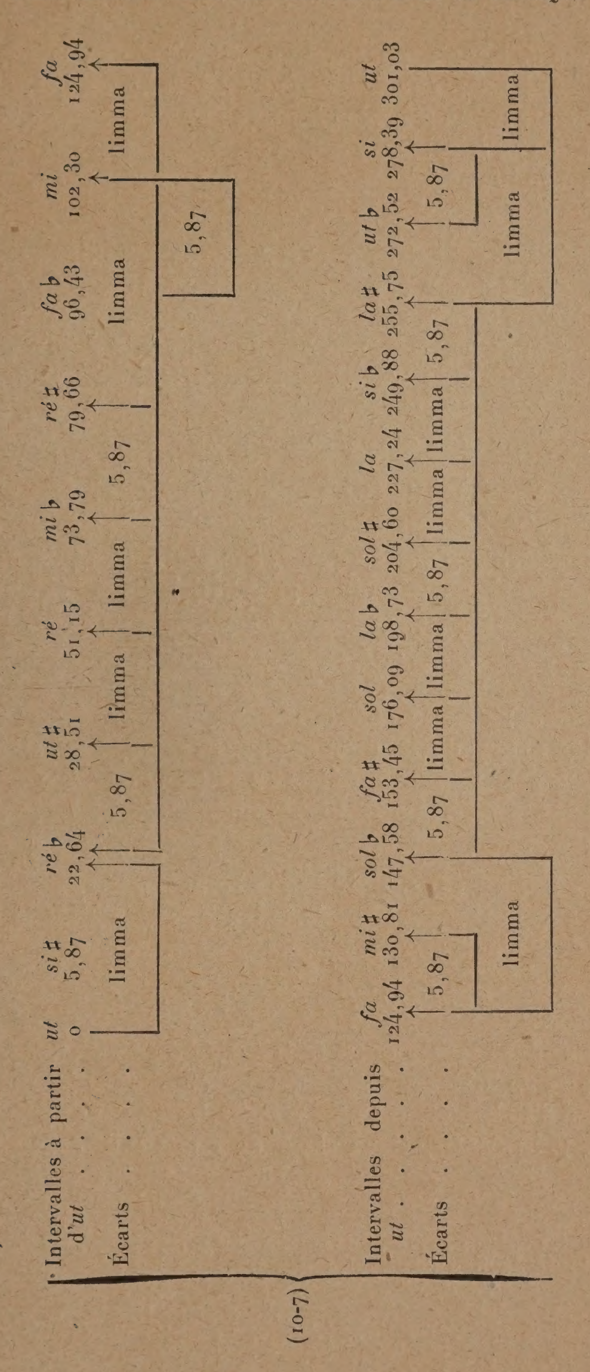
(10-5) *fa*♯ *ut*♯ *sol*♯ *ré*♯ *la*♯ *mi*♯ *si*♯,

et en abaissant de 8 quintes, on trouve après le *fa* (1re quinte)

(10-6) *si*♭ *mi*♭ *la*♭ *ré*♭ *sol*♭ *ut*♭ *fa*♭.

En définitive, dans le système pythagoricien, on a 21 sons distincts dans l'intervalle d'octave, qui se placent par hauteurs croissantes dans l'ordre suivant :

(1) On ne retombe jamais exactement sur une note déjà obtenue, de sorte qu'on pourrait continuer la série en définissant des doubles dièzes et doubles bémols, et ainsi de suite.


Intervalles à partir d'ut . . . .
ut 0
si ♯ 5,87
ré ♭ 22,64
ut ♯ 28,51
ré 51,15
mi ♭ 73,79
ré ♯ 79,66
fa ♭ 96,43
mi 102,30
fa 124,94
Écarts . . . .
limma
5,87
limma
limma
limma
5,87
limma
limma
5,87
Intervalles depuis ut . . . .
fa 124,94
mi ♯ 130,81
sol ♭ 147,58
fa ♯ 153,45
sol 176,09
la ♭ 198,73
sol ♯ 204,60
la 227,24
si ♭ 249,88
la ♯ 255,75
ut ♭ 272,52
si 278,39
ut 301,03
Écarts . . . .
5,87
limma
5,87
limma
limma
limma
5,87
limma
limma
limma
5,87
limma
5,87
limma
limma
(10-7)

Les dièzes et bémols qui se confondent dans la gamme tempérée sont séparées ici parce qu'un limma n'est pas égal à la moitié d'un ton ; les dièzes sont un peu plus haut que les bémols, d'un intervalle (*comma pythagoricien*) égal à la différence (5,87) entre un ton majeur et le double du limma.

Transpositions. — Cette gamme à 21 sons permet 15 transpositions sans introduire de sons nouveaux. Prenons en effet pour toniques successives les 7 notes définies par quintes montantes, de *sol* à *ut* ♯ (1) (10-4,5) : nous retrouvons la gamme de Pythagore à 7 sons en diézant successivement les notes

fa ut sol ré la mi si,

de sorte que dans le ton de *ut* ♯, toutes les notes sont diézées.

Choisissons maintenant pour toniques les 7 notes définies par quintes descendantes, de *fa* jusqu'à *ut* ♭ (10-6) ; nous obtenons encore la même succession d'intervalles pythagoriciens en bémolisant les notes

si mi la ré sol ut fa ;

la gamme de *ut* ♭ possède 7 bémols.

On a bien 15 tons différents et non 12 comme dans la gamme tempérée, parce que les tons de *ré* ♭, *sol* ♭, *ut* ♭ au lieu d'être confondus avec ceux de *ut* ♯, *fa* ♯, *si*, sont un peu au-dessous de ces derniers.

Gamme à cinq sons. — Si l'on se borne à porter 2 quintes au-dessus et 2 quintes au-dessous de la tonique, on obtient la gamme primitive des Chinois et des Gaëls,

ut ré fa sol si ♭ *ut*.

On trouve dans cette gamme trois degrés d'un ton et deux degrés d'un ton plus un limma.

L'opinion d'Helmholtz est que les airs écossais, en proscrivant le demi-ton, présentent quelque chose de « particulièrement clair et alerte ».

(1) Les notes suivantes (10-5) de sol ♯ à si ♯ prises pour toniques nécessiteraient l'introduction de doubles dièzes.

GAMME DIATONIQUE MAJEURE DE ZARLIN

Le système de Pythagore est basé sur une observation exacte : l'affinité de deux sons dont les hauteurs sont dans le rapport de 2 à 3 ; cependant, il ne constitue pas une échelle naturelle de sons, parce que la notion d'affinité s'y trouve beaucoup trop restreinte, étant limitée aux affinités de l'octave, de la quinte et de la quarte (1). Sans doute, les sons pythagoriciens ne sont pas complètement indépendants, puisque dans la série (10-3) chacun d'eux est relié au précédent par une proche parenté, mais l'affinité avec la tonique s'atténue très vite : *en procédant par affinités de proche en proche, on perd de vue la tonique.*

Or, dans l'évolution de la musique, l'idée de *tonalité* s'est accentuée de plus en plus nettement ; les considérations basées sur l'affinité des sons pris deux à deux se sont effacées devant d'autres, tirées de la nécessité de relier tous les sons le mieux possible à un centre unique.

Principe de tonalité. — De l'avis d'Helmholtz, le principe fondamental du développement de la musique moderne est le suivant : « *la masse tout entière des sons et des transitions harmoniques doit* « *présenter une affinité étroite et toujours nettement appréciable,* « *avec une tonique librement choisie, qui doit être à la fois le* « *point de départ et le point d'arrivée de tout l'ensemble des* « *sons* ».

« Le monde ancien a développé ce principe dans la musique homo« phone, le monde moderne dans la musique harmonique. Mais, « comme on le voit, c'est là un principe esthétique, non emprunté aux « fatalités naturelles ».

Il s'agit donc de déterminer le critérium d'une affinité entre deux sons. Depuis longtemps, on s'est aperçu que c'est la simplicité du rapport entre les nombres de vibrations (2) : voici, par exemple, ce que dit Euler (3) : « Quand l'oreille découvre aisément un rapport qui règne

(1) La tierce majeure juste, correspondant au rapport $\frac{5}{4}$ a été trouvée et fixée par Archytas (IVe siècle avant J.-C.) ; la tierce mineure $\frac{6}{5}$ a été indiquée par Erathosthène (IIIe siècle avant J.-C.).

(2) Pythagore introduisait la quarte par renversement de la quinte : abaissement d'une quinte et élévation d'une octave.

(3) Lettres à une princesse d'Allemagne (lettre IV).

« entre les sons, leur accord est nommé une *consonance* ; et, quand « ce rapport est très difficile à découvrir ou même impossible, « l'accord est nommé *dissonance* ».

Cette loi des rapports simples est l'expression d'un fait, mais elle ne constitue pas une explication. Comme dit Helmholtz « pour arri- « ver à reconnaître que les nombres de vibrations ont un rapport « déterminé pour des intervalles déterminés, la perception par les « sens ne fournit aucun moyen..., quiconque n'a pas fait d'expérien- « ces de physique n'a jamais eu dans sa vie l'occasion d'apprendre « quoi que ce soit sur les nombres de vibrations et leurs rapports. « Et c'est dans ce cas pourtant que se trouvent, pendant toute leur « vie, la majorité des hommes qui aiment la musique ».

On doit ajouter, avec M. Bouasse, qu' « une consonance peu altérée « sonne à peu près aussi bien qu'une consonance juste et mieux « qu'une plus fortement altérée, *quoiqu'en général le rapport « numérique qui exprime l'accord atteigne sa plus grande compli- « cation par une faible altération.* L'oreille serait donc capable de « distinguer, non seulement que l'intervalle est simple ou non, mais « encore que l'intervalle complexe diffère peu de s'exprimer par une « fraction simple ; ce qui est une hypothèse bien singulière. »

Rôle des harmoniques. — Ainsi que l'avaient déjà reconnu plusieurs musiciens et physiciens (1), Helmholtz a développé l'opinion que *les sons présentent d'autant plus de parenté qu'ils ont plus d'harmoniques communs, et que ces sons communs sont plus intenses par rapport aux autres.* Cette théorie est incontestablement fondée : les harmoniques jouent en acoustique et en musique un rôle fondamental, car ils sont toujours présents, en plus ou moins grand nombre, dans les sons que produisent les instruments.

Nous avons vu, en effet, que les cordes et les tuyaux donnent des harmoniques dont les amplitudes relatives sont déterminées par les conditions initiales. Il est vrai que certains corps vibrants, tels que les verges, donnent des sons partiels qui ne sont pas, à proprement parler, des harmoniques, mais dans ce cas encore, de véritables harmoniques prennent naissance dès que l'amplitude n'est plus très petite, et que la force qui tend à rappeler le corps vibrant à sa position d'équilibre n'est pas proportionnelle à l'écart (théorie d'Helm-

(1) Tartini (1754) avait déjà fondé la consonance sur l'existence des sons résultants ; Rameau (1750) et d'Alembert (1762) sur l'existence des harmoniques. La théorie de la *base fondamentale* exposée dans la *Démonstration du principe de l'harmonie* de Rameau ne diffère que peu de la théorie de Helmholtz (Voir Bouasse, *Les bases physiques de la musique*, p. 56).

holtz, § 87). En tout cas, les seuls sons utilisés en musique sont ceux pour lesquels les sons partiels ont des hauteurs multiples de la hauteur du son fondamental (1).

Nous pouvons donc adopter sans hésitation le principe de la parenté basée sur l'existence d'harmoniques communs aux deux sons.

La règle des rapports simples s'explique alors immédiatement. Soient deux sons A et B, N_A et N_B les nombres de vibrations des sons fondamentaux ; posons

$$\frac{N_B}{N_A} = \frac{p}{q} \qquad (p \text{ et } q \text{ entiers}) ;$$

ou

$$pN_A = qN_B ;$$

cela veut dire que le $q^{\text{ième}}$ son partiel (2) du son complexe B coïncide avec le $p^{\text{ième}}$ partiel du son A ; il y a donc une affinité entre les deux sons complexes. Cette affinité est, pour les deux raisons suivantes, d'autant plus grande que p et q sont plus petits :

1° Ce sont seulement les premiers harmoniques qui ont une intensité notable ; il résulte d'ailleurs de là que le sentiment de l'affinité des sons doit dépendre du timbre (3);

2° Non seulement, les partiels d'ordres respectifs p et q coïncident, mais il en est de même des partiels $2p$ et $2q$, $3p$ et $3q$, ..., de sorte que les harmoniques d'un des sons fondamentaux coïncident avec ceux de l'autre son de p en p pour le son A et de q en q pour le son B. Autrement dit, il y a d'autant plus de sons partiels communs et d'autant moins de sons partiels discordants que p et q sont plus petits (4).

(1) Comme dit M. Bouasse « il n'arrivera à personne de prendre pour base d'un système musical le son des cymbales, des cloches ou du tambour ».

(2) Le son fondamental est le partiel n° 1, le premier harmonique, le partiel n° 2, etc.

(3) Helmholtz a constaté que deux tuyaux bouchés, ne donnant pas d'harmoniques appréciables, dont l'intervalle est intermédiaire entre $\frac{4}{5}$ (tierce majeure) et $\frac{5}{6}$ (tierce mineure) donnent « des consonances tout aussi bonnes que si l'intervalle était exactement d'une tierce majeure ou d'une tierce mineure ». Sans doute, un auditeur à l'oreille exercée, trouvant cet intervalle étrange et inusité, le déclarera faux, mais « l'impression immédiatement produite sur l'oreille, l'effet agréable pour les sens, abstraction faite de toute habitude musicale, ne sont pas plus mauvais que pour les intervalles justes ».

(4) On peut, si l'on veut, faire une place à part au cas où l'un des sons fondamentaux (et non plus seulement un des harmoniques) coïncide, à une ou deux octaves près, avec un partiel de l'autre son.

Notation. — Dans tout ce qui suivra, nous aurons fréquemment à considérer un intervalle appelé *comma* (1), égal à $\frac{81}{80}$ ou 5,39 savarts. Nous utiliserons une notation employée par Helmholtz : *ut*, *ré*, ..., etc. désigneront toujours les notes pythagoriciennes obtenues par séries de quintes ; nous exprimerons l'abaissement de 1 ou de 2 commas en soulignant une ou deux fois la note pythagoricienne ; plusieurs traits au-dessus de la note signifieront au contraire qu'elle a été élevée d'autant de commas.

Construction rationnelle de la gamme diatonique majeure. — Il est clair que l'intervalle qui donne le plus d'affinité entre deux sons est l'octave, puisque le son fondamental le plus haut, ainsi que tous ses harmoniques sont des harmoniques du son le plus grave

Premier son et harmoniques	1	2	3	4	5	6	7	8 ...
		↓		↓		↓		↓
Son à l'octave supérieure et harmoniques		2		4		6		8

Si l'on produit un accord, puis l'accord formé en élevant d'une octave toutes les notes, le nouvel accord était déjà contenu dans le premier (2).

Nous comprenons donc maintenant la cause de l'analogie des sons à l'octave (§ 91) et nous justifions physiquement la division principale, en intervalles d'octaves, de l'échelle des sons. Voyons comment nous obtiendrons les subdivisions, en procédant suivant la même règle, c'est-à-dire en cherchant la parenté des sons.

Après l'intervalle 2 nous devons prendre l'intervalle 3 appelé *douzième* (3), et (puisque nous voulons une subdivision inférieure à l'intervalle d'octave) abaisser la douzième d'une octave. C'est ainsi que nous obtenons la quinte juste harmonique $\frac{3}{2}$ (176,09 savarts). Voici la série des sons partiels en désignant la tonique par 2.

(1) Un peu plus petit que le comma pythagoricien (5,87).

(2) Il est à peine besoin de faire remarquer que les noms *seconde, tierce, quarte, quinte, ..., octave, ..., douzième*, etc., dérivent des numéros d'ordre, dans la gamme à 7 sons par octave, de la note qui termine l'intervalle, le numéro 1 étant attribué à la note origine.

(3) Un accompagnement à l'octave présente un caractère de pauvreté et de monotonie qui a été reconnu par les musiciens ; il est proscrit dans une composition à plusieurs parties.

Tonique et ses harmoniques .	2	4	6	8	10	12
			↓			↓
Douzième et harmoniques.			6			12
			↓			↓
Quinte et harmoniques.		3	6	9		12

La coïncidence des harmoniques de la tonique avec ceux de la douzième ou de la quinte n'a plus lieu que de 3 en 3, mais c'est la parenté la plus voisine après l'octave. Dans la quinte s'ajoutent de nouveaux sons ; néanmoins la répétition à la quinte d'une mélodie ou d'un accord est la plus proche qu'on puisse obtenir avec un intervalle moindre que l'octave. Il est donc évident que la subdivision $\frac{3}{2}$ est fondamentale ; en fait tous les peuples l'ont adoptée depuis la haute antiquité.

Prenons, pour fixer les idées, la note ut_1 comme tonique. La note à la quinte au-dessus est sol_1. Portons au-dessous de ut_2 l'intervalle de quinte harmonique ; nous obtenons une note fa_1 qui présente avec le premier harmonique ut_2 de ut_1 la même parenté que celle des notes ut_1 et sol_1, et l'intervalle $ut_1\,fa_1$ est la quarte harmonique $\left(\frac{4}{3}\right)$ renversement de la quinte.

L'intervalle *fa sol*, de 51,15 savarts, est le *ton majeur harmonique*, déjà défini au paragraphe précédent.

Nous sommes donc arrivés à la division *ut fa sol* (1) avec les mêmes intervalles que dans la gamme de Pythagore ; nous avons d'ailleurs opéré de la même manière, mais pour aller plus loin, au lieu de procéder par quintes successives nous continuerons à chercher les affinités avec la tonique.

Le 4e son partiel de ut_1 donne la double octave et n'introduit pas de son nouveau dans la gamme : le 5e partiel, ramené dans l'octave de la tonique conduit au rapport $\frac{5}{4}$, ou intervalle de 96,91 savarts. Nous obtenons la note $\underline{mi_1}$ à un comma exactement au-dessous du mi_1 pythagoricien, et à 3 savarts environ au-dessous du *mi* tempéré.

Le 6e partiel redonne la quinte, par la double octave de celle-ci. Le 7e partiel donne l'intervalle $\frac{7}{4}$: c'est une note que nous désignerons par *si* $\flat_1$ (—) à près de 7 savarts au-dessous du *si* $\flat_1$. Le 8e partiel est la triple octave de la tonique. Le 9e conduit au rapport $\frac{9}{8}$ qui

(1) Helmholtz rapporte que, d'après une notice de Boethius, depuis la plus haute antiquité jusqu'à Orphée, la lyre n'aurait eu que les sons *ut fa sol ut*.

représente exactement l'intervalle *fa-sol* ou un ton majeur ; il donne le *ré*$_1$.

Ainsi, en ne considérant que les harmoniques de la tonique, nous sommes conduits à la division, qui se reproduit d'octave en octave,

(10-8)

	ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*si* ♭ (—)	*ut*
Intervalles à partir de *ut*	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{7}{4}$	2
Intervalles en savarts	0	51,15	96,91	124,94	176,09	243,04	301,03
Intervalles successifs		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{8}{7}$
ou		51,15 ton majeur	45,76 ton mineur	28,03 demi-ton majeur	51,15 ton majeur	66,95 non usité	57,99 non usité

Ce résultat conduit aux remarques suivantes :

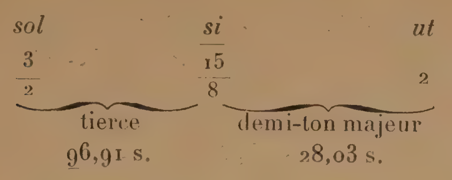
Il n'y a aucune objection à faire à cette division entre *ut* et *sol* ; le *mi* a une parenté assez proche avec la tonique ; il est vrai que le *ré* et l'*ut* ont une affinité déjà éloignée, mais l'intervalle *ut-ré* est le ton majeur déjà existant entre *fa* et *sol*, et surtout le *ré* est un proche allié du *sol* (*ré-sol* = quarte juste) qui est la note la plus importante après la tonique.

Comme le *mi* est le *mi* pythagoricien abaissé d'un comma, nous obtenons deux nouveaux intervalles :

L'intervalle *ré-mi*, $\frac{10}{9}$, appelé *ton mineur*, égal au ton majeur moins un comma.

L'intervalle *mi-fa* appelé *demi-ton majeur*, égal au limma augmenté d'un comma.

Septième et sixte. — Si la première partie (jusqu'au sol) de la division obtenue est satisfaisante, par contre le recoupement de la quarte *sol*$_1$-*ut*$_2$ par le *si*$_1$ ♭ (—) ne plaît pas à l'oreille. L'intervalle $\frac{7}{6}$ est bien grand par rapport aux intervalles précédents ; mais c'est principalement l'intervalle $\frac{8}{7}$ qui est trop grand étant donné sa position parce que *l'oreille demande dans la gamme ascendante un son préparatoire de l'octave de la tonique* ; il faut donc un son faisant avec *ut*$_2$ un intervalle assez petit. Il est naturel de choisir le demi-ton majeur, existant déjà entre *mi* et *fa* ; nous obtenons alors la note *si*, à laquelle le *si* ♭ (—) doit céder la place. Cela donne



sol-si est une tierce égale à la *tierce majeure juste ut-mi*, formée d'un ton majeur plus un ton mineur ; comme l'intervalle est trop grand, une idée très naturelle est de le diviser exactement comme *ut-mi* ; on obtient ainsi la gamme à 7 sons suivante

(10-9)

ut		*ré*		*mi*		*fa*		*sol*		*la*		*si*		*ut*
1		$\frac{9}{8}$		$\frac{5}{4}$		$\frac{4}{3}$		$\frac{3}{2}$		$\frac{27}{16}$		$\frac{15}{8}$		2
	$\frac{9}{8}$		$\frac{10}{9}$		$\frac{16}{15}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{10}{9}$		$\frac{16}{15}$	

Cette manière de procéder divise l'octave en ce qu'on a appelé deux *tétrachordes*, qui ici sont semblables, le second étant la répétition du premier à la quinte au-dessus

ut ré mi fa *sol la si ut*.

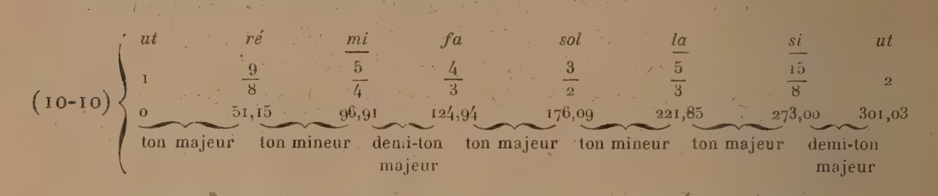
Etant donnée l'affinité des sons séparés par l'intervalle de quinte, ce système, qui a été employé chez les Grecs, peut se défendre ; *ut* reste la note prépondérante puisqu'elle est à la fois la note fondamentale du premier tétrachorde et la finale du second. Cependant le caractère de tonique de l'*ut* est un peu atténué à l'avantage du *sol*, qui devient une sorte de tonique pour le second tétrachorde ; ceci est une objection qu'on peut présenter sous une autre forme en remarquant que la note pythagoricienne *la* $\left(\frac{27}{16}\right)$ n'a avec la tonique *ut* aucune parenté appréciable.

Zarlin (XVIe siècle) a interverti, dans le second tétrachorde, les tons majeur et mineur, ce qui donne *la*, inférieur d'un comma à la quinte de *ré*. La théorie que nous exposons, en accord d'ailleurs avec l'impression musicale, donne raison à Zarlin, car *la* correspond au rapport simple $\frac{5}{3}$; autrement dit, le 3e partiel de la_1, qui est mi_3, est le 5e partiel de ut_1 : c'est une affinité assez grande.

Il ne faut pas objecter que *la* ne forme plus avec *ré* une quinte

juste ; qu'importe, puisque *ré* n'a qu'une affinité un peu lointaine avec la tonique. Au contraire même, le fait que *ré-la* est une quinte faussée renforce la prépondérance de l'*ut*, accuse son caractère de tonique.

En définitive, nous sommes arrivés à la *gamme diatonique majeure de Zarlin*, adoptée depuis plusieurs siècles par tous les musiciens comme *gamme naturelle*.

(10-10)


Comparativement à la gamme de Pythagore, la tierce, la sixte et la septième ont été abaissées d'un comma. La théorie des consonances (§ 97) nous montrera sous un autre aspect la justification de l'abaissement de la tierce et de la sixte.

Remarques sur les intervalles de seconde et de septième. Rôle de la sensible. — Les notes voisines de la tonique et de son octave, *ré* et *si* sont moins nettement fixées que les autres par la considération des harmoniques, car elles correspondent aux rapports les moins simples. Didymus (1er siècle) avait introduit *ré*

ut *ré* *mi*

$\frac{10}{9}$ $\frac{9}{8}$

Ptolémée, au contraire, a adopté la division

ut *ré* *mi*

Helmholtz remarque que *dans un mouvement mélodique*, où le *ré* arrive, soit entre le *fa* et le *la*, soit immédiatement après, il sera plus naturel pour un chanteur de donner le *ré* directement allié au *la* et ayant une assez proche parenté avec le *fa* (rapport $\frac{6}{5}$ ou tierce mineure). « La parenté plus étroite de *ré* avec la tonique peut ici à peine décider la question ».

Quant à la note *si*, son rôle est très particulier : nous avons dit qu'elle sort de préparation à l'octave de la tonique ; on l'a appelée la *sensible* ; elle prend, de ce fait, une grande importance. Mais, comme elle n'a avec la tonique qu'une parenté extrêmement faible, sa hau-

teur est très mal fixée : lorsque, dans une mélodie, le *si* monte vers l'*ut*, on a tendance à le rapprocher encore d'*ut* et à le prendre à peu près à la hauteur du *si* pythagoricien (1).

Loin d'introduire dans la gamme un élément étranger, la sensible vient affirmer la prépondérance de la tonique.

TRANSPOSITIONS EXACTES DANS LA GAMME NATURELLE

Prenons successivement pour toniques les sept notes (10-10) de la gamme d'*ut* majeur. Conservant les mêmes intervalles à partir de la tonique, nous obtenons les sept gammes suivantes :

	ton d'*ut* majeur	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
	ton de *sol*	*sol*	*la*	*si*	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*♯	*sol*
	ton de *ré*	*ré*	*mi*	*fa*♯	*sol*	*la*	*si*	*ut*♯	*ré*
(10-11)	ton de *la*	*la*	*si*	*ut*♯	*ré*	*mi*	*fa*♯	*sol*♯	*la*
	ton de *mi*	*mi*	*fa*♯	*sol*♯	*la*	*si*	*ut*♯	*ré*♯	*mi*
	ton de *si*	*si*	*ut*♯	*re*♯	*mi*	*fa*♯	*sol*♯	*la*♯	*si*
	ton de *fa*	*fa*	*sol*	*la*	*si*♭	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*

On a ainsi 11 sons nouveaux, le *si*♭ de la gamme de Pythagore et 10 notes diézées toutes au-dessous, de 1 ou de 2 commas, des notes pythagoriciennes.

On voit qu'avec 18 sons différents par octave, on pourrait transposer rigoureusement en prenant pour tonique l'un quelconque des sons (non diézés ni bémolisés) de la gamme naturelle d'*ut* majeur. Mais on ne pourrait pas transposer en choisissant pour tonique les nouvelles notes obtenues, à moins d'introduire encore de nouveaux sons. Une pareille complication est inextricable pour les instruments à sons fixes : c'est pourquoi on a cherché une gamme tempérée.

Nous examinerons plus loin cette question du tempérament.

(1) « L'autre demi-ton de la gamme, *mi-fa*, ne semble point monter vers le *fa*, quand la tonalité est bien établie, parce que le *mi* a, avec la tonique *ut*, un rapport nettement indiqué, ce qui le détermine avec sûreté pour le sentiment musical. Aussi l'auditeur ne songera-t-il pas à ne considérer le *mi* que comme le précurseur du *fa* » (Helmholtz).

MODE DIATONIQUE MINEUR

Ecrivons la série diatonique des sons de la gamme naturelle d'*ut* (10-10), en commençant par le *la*

(10-12) *la* *si* *ut* *ré* *mi* *fa* *sol* *la*.

Faisons évoluer une mélodie autour de *la*, en ramenant cette note à la fin des diverses phrases et comme finale du morceau : nous donnons ainsi une prépondérance à *la*, nous en faisons une sorte de tonique. Le caractère du *mode* musical est complètement changé : du mode majeur, nous sommes passés au *mode mineur*. On doit toutefois faire deux retouches à la série (10-12) :

1° Puisque *la* joue le rôle de tonique, il faut abaisser le *ré* d'un comma, de manière à avoir $ré_1$ présentant avec la_1 l'affinité de quarte juste.

2° L'oreille demande, *dans la gamme ascendante*, un rapport de sensible : on obtient la sensible en remplaçant *sol* par *sol*♯.

La gamme mineure ascendante, dans le ton de *la*, s'écrit donc

(10-13)	*la*		*si*		*ut*		*ré*		*mi*		*fa*		*sol*♯		*la*
		ton majeur		demi-ton majeur		ton mineur		ton majeur		demi-ton majeur		ton majeur + 17,73 s		demi-ton majeur	
	0		51,15		79,18		124,94		176,09		204,12		273,00		301,03
	1		$\frac{9}{8}$		$\frac{6}{5}$		$\frac{4}{3}$		$\frac{3}{2}$		$\frac{8}{5}$		$\frac{15}{8}$		2

Mais la gamme descendante n'exige plus de rapport de sensible, de sorte qu'on peut *ad libitum*, rétablir le *sol*

(10-14) la_1 sol_1 fa_1 mi_1 $ré_1$ ut_1 si_0 la_0.

Certains compositeurs ont jugé que l'intervalle *fa sol*♯, qui a cependant l'intérêt d'accentuer le caractère plaintif du mode mineur, était trop grand (les chanteurs ont quelque peine à l'exécuter) ; ils ont préféré, comme gamme mineure ascendante, la série

(10-15) *la* *si* *ut* *ré* *mi* *fa*♯ *sol*♯ *la*

qui ne diffère de la gamme majeure du ton de *la* (10-11) que par l'abaissement de *ut*♯ à *ut*. La gamme descendante employée est

alors (10-14). Ces échelles (10-15) et (10-14) étaient les plus usitées du temps de Rameau.

L'intervalle *la-ut*, renversement de la sixte majeure, se nomme *tierce mineure* ; il correspond à un rapport encore assez simple, $\frac{6}{5}$.

L'intervalle *la-fa* $\left(\frac{8}{5}\right)$ est appelé *sixte mineure*, c'est le renversement de la tierce majeure.

L'intervalle dont a été abaissé l'*ut* ♯ de la gamme majeure du ton de *la*, égal à l'intervalle dont a été élevé le *sol*, est un *demi-ton mineur* : il a pour valeur $\frac{25}{24}$ ou 17,73 savarts, et est égal à la différence entre un ton mineur et un demi-ton majeur.

Nous avons déduit la gamme de *la* mineur de celle d'*ut* majeur ; ces deux gammes sont associées. Aussi dit-on, d'une façon générale, qu'un ton mineur est le *relatif* du ton majeur situé à un ton majeur plus un demi-ton majeur au-dessus.

Par exemple le ton d'*ut* mineur est le relatif du ton de *mi* ♭ majeur ; la gamme (10-13) s'écrit, en *ut* mineur

(10-16) *ut* *ré* *mi* ♭ *fa* *sol* *la* ♭ *si* *ut*

et les gammes (10-14) (10-15) deviennent

(10-17) ut_2 si_1♭ la_1♭ sol_1 fa_1 mi_1♭ $ré_1$ ut_1

(10-18) *ut* *ré* *mi* ♭ *fa* *sol* *la* *si* *ut*

On voit que le mode mineur présente une plus grande variété que le mode majeur. Il est moins bien fixé (1), parce que la parenté avec la tonique de la note située à la sixte mineure $\left(\frac{8}{5}\right)$ est notablement moindre que celle de la note à la sixte majeure $\left(\frac{5}{3}\right)$. Mais précisément, il est dans l'essence même du mode mineur de chercher un caractère plus flou que le mode majeur ; aussi, lorsqu'on supprime ce caractère dans le haut de la gamme ascendante en conservant la sixte majeure (10-15), doit-on le rétablir dans la gamme descendante (10-14).

« Le mode majeur, dit Helmholtz, convient bien à tous les senti-
« ments bien caractérisés, clairs par eux-mêmes, à la résolution

(1) C'est pourquoi, dans l'écriture, on indique les altérations par la même armure de clef pour un ton majeur et pour son relatif mineur, quitte à mettre, au cours du morceau, le signe nécessaire pour hausser la sensible de la gamme mineure chaque fois qu'elle se présente.

« énergique, comme à la modération ou à la douceur, à la tristesse « même, lorsqu'elle se mêle à une impatience tendre ou enthousiaste. « Mais il ne convient pas du tout aux sentiments sombres, inquiets, « inexpliqués, à l'expression de l'étrangeté, de l'horreur, du mystère « ou du mysticisme, de l'âpreté sauvage, de tout ce qui contraste « avec la beauté artistique. C'est précisément pour tout cela que nous « faisons usage du mode mineur avec son harmonie voilée, sa gamme « variable, ses modulations faciles, son principe et sa structure plus « incertains pour l'oreille. La forme majeure ne serait point appro- « priée aux expressions de cette nature, et, par là, à côté d'elle, le « mode mineur trouve pleinement sa raison d'être dans l'art. »

MODES GRECS ET DU PLAIN-CHANT

Le principe de tonalité (§ 94) attribue à une même note, la tonique, deux rôles différents.

La tonique est, avant tout, le son musical avec lequel les autres ont la plus grande affinité ; c'est elle qui détermine le choix des autres sons.

En second lieu, la tonique est la note la plus grave et son octave la note la plus aiguë de la gamme dans l'étendue d'une octave : autrement dit, c'est à partir de cette note qu'on considère la succession des intervalles. Pour affirmer ce caractère de note fondamentale, dans une mélodie on la ramène plus souvent que les autres et elle sert de finale aux diverses phrases (1).

Nous avons vu que la gamme diatonique majeure de Zarlin est conforme à ce principe. Dans la construction de la gamme mineure nous avons, au début, séparé les deux rôles de la tonique ; reprenons en effet la succession d'intervalles (10-12)

$$\underline{la} \quad \underline{si} \quad ut \quad ré \quad \underline{mi} \quad fa \quad sol \quad \underline{la} ;$$

si nous adoptons cette gamme telle quelle, $\underline{la}$ est la note qui joue le rôle de fondamentale, tandis que *ut* reste la note qui a servi à fixer les autres sons. Mais l'idée de tonalité conduit à retoucher un peu cette gamme, de manière à renforcer le rôle du $\underline{la}$ au point de vue de sa parenté avec les autres sons ; malgré cela, la tonalité de la gamme mineure ne s'accuse pas aussi nettement que celle de la gamme

(1) Dans l'harmonie, on affirme la tonalité par l'emploi des accords consonnants du ton et par l'accord dit « parfait » (§ 99) servant de finale.

majeure. Le mode mineur « est né, pour ainsi dire, d'un compromis « entre les diverses exigences de la loi de tonalité et de l'enchaîne- « ment de la trame harmonique » (Helmholtz).

Tant qu'on a fait usage de la gamme de Pythagore, où les affinités sont établies de proche en proche, le sentiment du double rôle attribué aujourd'hui à la tonique ne pouvait guère se développer (1). A l'apogée de la civilisation grecque, on se servait pour accompagner le chant de lyres à 8 cordes, donnant entre les sons extrêmes l'intervalle d'octave, et dont les sons intermédiaires étaient ceux de la gamme à 7 sons de Pythagore.

Désignons par

ut ré mi fa sol la si

ces 7 sons, présentant les intervalles indiqués au paragraphe 93. A chacun d'eux, pris pour son le plus grave avec son octave pour son le plus haut correspondait un *mode* (2)

	1	*ut*	*ré*	*mi*	*FA*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
	2	*ré*	*mi*	*fa*	*SOL*	*la*	*si*	*ut*	*ré*
	3	*mi*	*fa*	*sol*	*LA*	*si*	*ut*	*ré*	*mi*
(10-20)	4	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*UT*	*ré*	*mi*	*fa*
	5	*sol*	*la*	*si*	*ut*	*RÉ*	*mi*	*fa*	*sol*
	6	*la*	*si*	*ut*	*ré*	*MI*	*fa*	*sol*	*la*
	7	*si*	*ut*	*ré*	*mi*	*FA*	*SOL*	*la*	*si*

Les trois premières séries se divisent en deux tétrachordes disjoints ; les trois suivantes sont formées respectivement des mêmes tétrachordes que les premières, mais intervertis et conjoints (la note finale du premier est la note initiale du second), et la note la plus grave est isolée. Dans la 7e série, il semble qu'on ait admis un tétrachorde tronqué.

Ainsi, chaque degré de la gamme diatonique était employé comme son initial ou final d'un mode particulier. La tonique — réduite à un rôle de refrain — était, soit le son le plus grave, soit (d'après Aris-

(1) Pourtant Aristote avait compris que la justesse des sons n'est autre chose qu'une relation avec l'un d'eux (Problemata 20 et 36).

(2) De même la gamme à 5 sons (§ 93) donne lieu à 5 modes. On trouve des exemples de chacun d'eux dans les mélodies écossaises (voir Helmholtz, *loc. cit.*, chap. XIV).

tote) un autre son, appelé son central (écrit en majuscules sur notre tableau), qui terminait le premier tétrachorde. Dans le cas où ce son central était pris comme tonique, il servait de début et de refrain, mais non de finale, car la terminaison se faisait sur le son le plus grave : la tonique, dont les attributs étaient déjà incomplets, perdait même le rôle de finale.

Les modes du plain-chant d'église dérivent des modes grecs. Le plus ancien plain-chant a été institué par l'évêque Ambroise de Milan (IVe siècle) ; les quatre gammes ambrosiennes ne sont autres que les modes 1, 2, 3, 4 du tableau (10-20), *avec la note la plus basse prise pour tonique* : nous les indiquerons ici sous les noms donnés par Glaréanus (1547) (1).

(10-21)

Dorien . .	*RÉ*	*mi*	*fa*	*sol*	(*la*)	*si*	*ut*	*ré*
Phrygien .	*MI*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	(*ut*)	*ré*	*mi*
Lydien . .	*FA*	*sol*	*la*	*si*	(*ut*)	*ré*	*mi*	*fa*
Mixolydien.	*SOL*	*la*	*si*	*ut*	(*ré*)	*mi*	*fa*	*sol*

La note entourée d'un cercle est celle qui revient le plus souvent après la tonique ; on l'a appelée *dominante*.

Le pape Grégoire le Grand introduisit quatre gammes ayant les mêmes toniques que les gammes ambrosiennes, mais s'étendant de la quarte au-dessous à la quinte au-dessus de la tonique. Les modes des *chants grégoriens* sont les suivants

(10-22)

Hypodorien. . .	*la*	*si*	*ut*	*RÉ*	*mi*	(*fa*)	*sol*	*la*
Hypophrygien . .	*si*	*ut*	*ré*	*MI*	*fa*	*sol*	(*la*)	*si*
Hypolydien . . .	*ut*	*ré*	*mi*	*FA*	*sol*	(*la*)	*si*	*ut*
Hypomixolydien .	*ré*	*mi*	*fa*	*SOL*	*la*	*si*	(*ut*)	*ré*

De tels modes ont été appelés *plagaux*, et par opposition les modes ambrosiens ont été dits *authentiques*. Dans les modes plagaux, la tonique joue le rôle du « son central » des modes grecs, mais avec cette différence qu'elle est invariablement placée à la quarte supérieure de la note la plus grave et qu'on a reconnu comme règle la loi de la terminaison sur la tonique. Dès lors, la première note des

(1) D'après Helmholtz, les vrais noms grecs sont différents ; cependant nous adoptons la notation de Glaréanus parce qu'elle est familière aux musiciens.

gammes grégoriennes est simplement celle jusqu'où descend la voix(1).

Aucun des modes précédents ne correspond à nos modes majeur et mineur ; on va reconnaître ceux-ci parmi les modes suivants qui, fait assez singulier, n'ont été employés qu'à partir du XVI[e] siècle.

(10-23)

authentique : Ionien . .	*UT*	*ré*	*mi*	*fa*	(*sol*)	*la*	*si*	*ut*
							(mode majeur)	
plagal : Hypoionien. . .	*sol*	*la*	*si*	*UT*	*ré*	(*mi*)	*fa*	*sol*
authentique : Éolien . .	*LA*	*si*	*ut*	*ré*	(*mi*)	*fa*	*sol*	*la*
					(gamme mineure descendante)			
plagal : Hypoéolien. . .	*mi*	*fa*	*sol*	*LA*	*si*	(*ut*)	*ré*	*mi*

Ces divers modes, qui présentent des différences de même nature que celle qui existe entre nos modes majeur et mineur, peuvent être comparés plus facilement quand on les rapporte à la même tonique *ut. Il convient d'ailleurs d'abaisser ou d'élever d'un comma certaines des notes pythagoriciennes, de manière à leur donner une affinité nette avec la tonique.* En nous bornant aux modes authentiques (et éliminant le mode lydien non mélodique à cause de sa fausse quarte), nous obtenons les gammes suivantes

(10-24)

Dorien . . .	*ut*	*ré*	*mi* ♭	*fa*	*sol*	*la*	*si* ♭	*ut*
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{9}{5}$	2
Phrygien. . .	*ut*	*ré* ♭	*mi* ♭	*fa*	*sol*	*la* ♭	*si* ♭	*ut*
	1	$\frac{16}{15}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{9}{5}$	2
Mixolydien . .	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si* ♭	*ut*
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{9}{5}$	2
Ionien . . . . (gamme majeure)	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
Eolien . . .	*ut*	*ré*	*mi* ♭	*fa*	*sol*	*la* ♭	*si* ♭	*ut*
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{9}{5}$	2

(1) La dominante est au 5[e] degré dans les modes authentiques, comme dans les modes modernes ; elle est au sixième degré dans les modes plagaux. Toutefois, il y a des exceptions pour certains modes parce que les anciens évitaient de faire revenir trop souvent le *si* à cause de l'intervalle très dissonant qu'il donne avec le *fa* (quarte augmentée ou triton *fa-si*, et quinte diminuée *si-fa*) ; le *si* est toujours remplacé par l'*ut* s'il se présente comme une des notes principales.

D'après les rapports avec la tonique *ut*, on voit que ces modes sont en accord, à des degrés plus ou moins grands, avec la loi de tonalité. Celui qui, dans son ensemble, correspond aux rapports les plus simples est le mixolydien, mais il n'a pas de sensible, et nous verrons au prochain paragraphe qu'il présente moins d'accords consonants que le mode ionien : ce dernier lui a donc été préféré.

Le mode mineur moderne dérive du mode éolien (c'est ainsi que nous l'avons établi au paragraphe 96) ; plus exactement, les diverses formes de la gamme mineure résultent des modes dorien et éolien : en effet, la gamme descendante (10-17) est la gamme éolienne, la gamme (10-16) est la gamme éolienne avec remplacement du *si* ♭ par une sensible, et la gamme (10-18) est la gamme dorienne avec une sensible.

Les modes qui présentent une certaine imperfection tonale ne doivent pas pour cela être systématiquement abandonnés ; en fait, on en retrouve des restes dans certains accords ou certaines cadences de la musique moderne, et les compositeurs les utilisent encore, car ils peuvent parfois, précisément à cause de leur structure un peu anormale, s'adapter mieux que les modes usuels aux sentiments qu'il faut exprimer.

Le mode phrygien, par exemple, présente un caractère très particulier à cause du demi-ton placé dès le début de la gamme, ce qui donne une sensible descendante. Ce mode, dit Helmholtz, « présente le caractère du mode mineur, exalté, en quelque sorte, dans une certaine mesure. Ses sons, ses accords sont reliés entre eux, mais beaucoup moins clairement, beaucoup moins nettement que ceux du mode mineur... Le caractère esthétique du mode s'accorde avec ces résultats ; il convient admirablement bien aux sentiments mystérieux, mystiques, ou à l'expression de la plus grande prostration, celle où toute association d'idées semble impossible, à l'accablement dans la douleur (1). Comme, d'autre part, grâce à la sensible descendante, ce mode présente une certaine énergie dans le mouvement descendant, il peut aussi exprimer le sublime dans la gravité, dans la puissance, et même par la réunion des accords majeurs étrangers qui font partie du système, admettre une sorte de magnificence particulière, de richesse de couleurs remarquable ».

(1) Il est à remarquer que Saint-Saëns en a fait usage dans certaines phrases de la « danse macabre ».

CONSONANCES ET DISSONANCES

On appelle *consonance* un ensemble de sons agréable à l'oreille par sa douceur, *dissonance* un ensemble de sons donnant une impression de dureté.

Cette définition reste nécessairement vague, car les mots « douceur » ou « dureté » ne sauraient avoir une signification absolue : tous les degrés sont imaginables. Aussi certains accords, rangés aujourd'hui parmi les consonances, étaient-ils regardés autrefois comme des dissonances.

Néanmoins, la question se pose de chercher pourquoi tel ensemble de sons nous apparaît comme nettement consonant (deux sons à l'octave ou à la quinte, par exemple) pourquoi tel autre est jugé nettement dissonant (comme deux sons formant l'intervalle d'un demi-ton), et pourquoi tel accord est incontestablement plus consonant que tel autre.

Helmholtz pose le principe suivant :

« *La consonance est une sensation continue, et la dissonance une impression intermittente.* »

Ce principe est appliqué de la façon suivante : les intermittences proviennent des battements entre les sons fondamentaux, leurs harmoniques, et les sons résultants. Toute la question se ramène à la recherche des battements.

Il est remarquable que ce principe et cette manière de l'appliquer permettent de trouver les consonances et dissonances sur lesquelles tous les musiciens sont d'accord (1).

Lorsque deux sons (simples) forment un intervalle suffisamment grand pour que les résonateurs auriculaires sur lesquels ils agissent soient nettement distincts, ils ne peuvent se gêner mutuellement ils

(1) Sauveur (*Histoire de l'Académie des Sciences pour 1700*) avait déjà découvert le rôle des battements. « Les battements, dit-il, ne plaisent pas à l'oreille, à cause de l'inégalité du son, et l'on peut croire avec beaucoup d'apparence que ce qui rend les octaves si agréables, c'est qu'on n'y entend jamais de battements ».

« En suivant cette idée, on trouve que les accords dont on ne peut « entendre les battements sont justement ceux que les musiciens traitent « de *consonances* et que ceux dont les battements se font sentir sont les « *dissonances*. Quand un accord est dissonance dans une certaine octave « et consonance dans une autre, c'est qu'il bat dans l'une et ne bat pas « dans l'autre... Si cette hypothèse est vraie, elle découvrira la véritable « source des règles de la composition » (cité par Bouasse, *Les bases physiques de la musique*, p. 64).

Helmholtz a développé la théorie de Sauveur.

« résonent régulièrement l'un à côté de l'autre sans provoquer l'un dans l'autre des perturbations réciproques ».

Mais si l'intervalle est assez petit pour que les zones d'excitation empiètent l'une sur l'autre, les battements produisent des interruptions dans l'excitation des nerfs : *l'impression qui en résulte est dure et désagréable* parce que, dit Helmholtz, « toute excitation intermittente de nos appareils nerveux agit plus vivement qu'une excitation régulière et durable ». Une telle impression se produit *même si les battements sont trop rapides pour qu'on puisse les compter isolément* : dans ce cas nous percevons « une masse sonore confuse que nous ne pouvons pas séparer clairement en éléments isolés ».

Pour un nombre de battements donné $N_2 - N_1$, le caractère de dureté, c'est-à-dire le degré de dissonance, diminue quand les sons deviennent plus graves parce que l'intervalle $\frac{N_2}{N_1}$ croît et que par conséquent la zone de résonance commune aux deux sons devient plus petite.

D'autre part, pour un intervalle $\frac{N_2}{N_1}$ donné, le nombre des battements croît à mesure que les sons s'élèvent dans l'échelle musicale. Le caractère de dureté varie avec le nombre des battements : les battements assez lents (ordre de 10 par seconde) donnent un ronflement d'une dureté lourde ; les battements rapides donnent une dureté perçante et criarde ; l'impression est particulièrement désagréable pour une trentaine de battements par seconde ; avec une centaine de battements et même un peu davantage, l'impression aigre se fait toujours sentir, mais *si le nombre des battements augmente encore, l'effet désagréable s'atténue progressivement*, parce que l'excitation tend à devenir continue.

Nous devons maintenant appliquer ces résultats. Nous nous occuperons d'abord des harmoniques, parce que les battements entre harmoniques sont en général plus forts et plus nets que les battements dus aux sons résultants.

1° **Dissonances dues aux battements entre harmoniques d'un même son fondamental.** — Nous avons déjà dit que les harmoniques supérieurs donnent à un son complexe un timbre criard. La raison de ce fait se comprend aisément : soit N le son fondamental ; deux harmoniques consécutifs pN, $(p + 1)N$ donnent N battements ; d'autre part l'intervalle $\frac{p+1}{p}$ tend vers l'unité à mesure que l'ordre des harmoniques augmente ; à partir du 6e har-

monique, l'intervalle devient égal puis inférieur à 1 ton ; il est assez petit pour que l'impression perçante des N battements puisse se faire sentir.

Toutefois, à mesure que N augmente, la dureté décroît de sorte que les timbres de sons musicaux dont le fondamental est supérieur au milieu de l'octave 3 ne sauraient être aigres (1).

2° **Dissonances dues aux battements entre deux sons fondamentaux.** — Les sons fondamentaux ne peuvent produire par eux-mêmes de dissonance que si leur intervalle est assez faible : tel est le cas pour le demi-ton et le ton ; ces intervalles sont d'ailleurs bien plus dissonants dans le bas que dans le haut où les battements deviennent plus rapides. Les intervalles déjà grands de tierce mineure naturelle $\left(\frac{6}{5}\right)$ et de tierce majeure naturelle $\left(\frac{5}{4}\right)$ sont encore un peu exposés à l'influence réciproque des sons fondamentaux mais l'effet n'est plus appréciable dans le haut de l'échelle musicale.

3° **Accords de deux sons complexes. Battements entre les harmoniques** (2). — D'après ce qui précède, une dissonance ne peut jamais se produire entre deux sons *simples* dont l'intervalle est suffisamment grand, non pas tant à cause de la rapidité des battements qu'à cause de la grandeur de l'intervalle.

D'après les principes adoptés, *l'explication des dissonances des grands intervalles doit être cherchée dans les dissonances entre les petits intervalles que peuvent former les harmoniques* (et aussi les sons résultants). *Ces dissonances dépendent donc du timbre* ; elles dépendent aussi de la fréquence des battements, c'est-à-dire, pour un intervalle donné entre les sons fondamentaux, de la hauteur de cet intervalle dans l'échelle des sons.

Ce sont d'ailleurs en général les harmoniques inférieurs qui jouent le rôle principal, car ils sont presque toujours les plus intenses.

Dans le cas général, des battements entre harmoniques se produisent ; mais exceptionnellement, pour certains rapports des hauteurs des sons fondamentaux, les battements disparaissent ou sont très

(1) Sous la condition, bien entendu, que le son complexe ne contienne que de véritables harmoniques multiples entiers du fondamental. S'il y avait des sons partiels non harmoniques, comme cela peut arriver avec les anches, ceux-ci pourraient donner avec les harmoniques (toujours présents dès que l'intensité est notable), des battements désagréables.

(2) Ces battements s'entendent particulièrement bien sur l'harmonium, dont les jeux sont riches en harmoniques.

faibles parce qu'ils ont lieu entre des harmoniques peu intenses. On dit alors que l'accord est consonant.

Les sons de la voix humaine qui contiennent des harmoniques graves relativement forts, accusent nettement les consonances et les dissonances.

4° **Classification des consonances.** — a) *Consonances absolues.* — Il est évident que si $N_2 = pN_1$, tous les harmoniques de N_2 coïncident avec les harmoniques de N, et ne produisent pas de battements avec ces derniers. On a ainsi les consonances absolues : *unisson* (1), *octave* (2), *douzième* (3), *double octave* (4).

b) *Consonances parfaites.* — Helmholtz appelle ainsi la *quinte* et la *quarte* parce qu'elles peuvent être employées dans toutes les régions de la gamme, sans altération sensible de l'harmonie. Pour la quinte, nous avons

(10-25)
ut_i ut_{i+1} sol_{i+1} ut_{i+2} $\underline{mi_{i+2}}$
sol_i sol_{i+1} $ré_{i+2}$
sol_{i+2} $si\flat_{i+2}(-)$ ut_{i+3}
sol_{i+2} $\underline{si_{i+2}}$

$ré_{i+2}$ bat avec ut_{i+2} et avec $\underline{mi_{i+2}}$, mais ces deux derniers sont déjà des harmoniques un peu élevés, et les intervalles avec $ré_{i+2}$ sont d'un ton, ce qui est déjà un intervalle notable ; les battements sont donc très peu marqués. Entre le 5e son partiel de sol_i et le 7e ou le 8e partiel de ut_i l'intervalle n'est plus que de un demi-ton, mais ces harmoniques sont inexistants ou tout au moins très faibles dans les sons employés en musique.

La quarte est une consonance moins parfaite que la quinte, comme on le voit aisément d'après les harmoniques

(10-26)
ut_i ut_{i+1} sol_{i+1} ut_{i+2} mi_{i+2}....
fa_i fa_{i+1} ut_{i+2} fa_{i+2}

La quarte ne présente guère d'autre avantage essentiel que d'être le complément de la quinte pour former l'octave.

Mais dès que les intervalles de *quinte juste* $\left(\frac{3}{2}\right)$ et de *quarte juste* $\left(\frac{4}{3}\right)$ sont un peu faussés, des battements se font entendre,

parce qu'il n'y a plus exactement coïncidence entre ceux des harmoniques qui seraient confondus si l'intervalle était juste (les sol_{i+1}, sol_{i+2}, etc., pour la quinte, les ut_{i+2}, etc., pour la quarte). On voit que pour la quinte faussée, les battements se produisent entre le 3e partiel de la note la plus grave et le 2e de la note la plus aiguë, alors que pour la quarte il faut remonter respectivement aux 4e et 3e partiels ; la quarte est donc un peu moins sensible que la quinte à une altération de l'intervalle. Cette remarque est générale : *un intervalle est faussé d'une manière d'autant plus désagréable qu'il est plus consonant.* Cette règle n'est d'ailleurs qu'un autre aspect de celle que nous connaissons déjà : *une note de la gamme est d'autant mieux fixée que sa parenté avec la tonique est plus grande.*

c) *Consonances moyennes.* — Le groupe suivant est formé par la *sixte majeure* $\left(\frac{5}{3}\right)$ et la *tierce majeure* $\left(\frac{5}{4}\right)$.

Sixte majeure

$$(10\text{-}27)\quad \left\{\begin{array}{lllllll} ut_i & ut_{i+1} & sol_{i+1} & ut_{i+2} & & \underline{mi_{i+2}} & \\ la_i & & la_{i+1} & & & \underline{mi_{i+2}} & \\ & & sol_{i+2} & si\flat_{i+2}(-) & & & ut_{i+3} \\ & & la_{i+2} & & & & ut\sharp_{i+3} \end{array}\right.$$

Tierce majeure

$$(10\text{-}28)\quad \left\{\begin{array}{llllll} ut_i & ut_{i+1} & sol_{i+1} & ut_{i+2} & \underline{mi_{i+2}} & \\ \underline{mi_i} & \underline{mi_{i+1}} & \underline{si_{i+1}} & & \underline{mi_{i+2}} & \\ & & sol_{i+2} & si\flat_{i+2}(-) & & ut_{i+3} \\ & & \underline{\underline{sol\sharp_{i+2}}} & & \underline{si_{i+2}} & \end{array}\right.$$

Dans le cas de la sixte, la tierce mineure formée par le fondamental la_i et le 1er harmonique de ut_i est un intervalle déjà faible pour lequel les battements peuvent s'entendre ; si ceux-ci sont nombreux ils ne donnent pas de dureté, mais dans le grave l'intervalle est un peu moins bon. Une remarque semblable peut être faite pour la tierce majeure ; ici l'intervalle est un peu plus grand, mais il se produit entre les deux fondamentaux ; il ne sonne pas très bien dans le grave.

Les tierces et sixtes pythagoriciennes, plus grandes d'un comma, deviennent franchement des dissonances.

d) *Consonances imparfaites.* — Ce sont les renversements des précédents : *tierce mineure* $\left(\frac{6}{5}\right)$ et *sixte mineure* $\left(\frac{8}{5}\right)$.

Tierce mineure

$$(10\text{-}29)\left\{\begin{array}{ccccc} ut_i & ut_{i+1} & sol_{i+1} & ut_{i+2} & \\ \overline{mi\flat_i} & \overline{mi\flat_{i+1}} & \overline{si\flat_{i+1}} \nearrow\swarrow & & \\ & & & \underline{mi_{i+2}} & sol_{i+2} \ldots \\ & & & \overline{mi\flat_{i+2}} \nearrow\swarrow & sol_{i+2} \end{array}\right.$$

Sixte mineure

$$(10\text{-}30)\left\{\begin{array}{ccccc} ut_{i+1} & ut_{i+2} & sol_{i+2} & ut_{i+3} & \underline{mi_{i+3}} \\ & \overline{la\flat_{i+1}} & \nwarrow\searrow \overline{la\flat_{i+2}} & & \overline{mi\flat_{i+3}} \nearrow\swarrow \\ & & sol_{i+3} & si\flat_{i+3}\,(-) & ut_{i+3} \\ & & \nwarrow\searrow \overline{la\flat_{i+3}} & & ut_{i+3} \end{array}\right.$$

e) *Dissonances.* — Comme exemples de dissonances formées par deux sons de la gamme *naturelle*, nous choisirons la *quinte altérée ré-$\underline{la}$*, et le *triton fa-$\underline{si}$.*

La quinte altérée est inférieure d'un comma à la quinte juste ; il se produit des battements entre la_{i+1}, second harmonique de $ré_i$, et $\underline{la_{i+1}}$, premier harmonique de $\underline{la_i}$; si nous prenons pour $\underline{la_i}$ le $\underline{la_3}$ normal de 435 vibrations, nous avons

$$la_3 = \underline{la_3}\,\frac{81}{80} = 435\,\frac{81}{80}$$

et

$$la_3 - \underline{la_3} = 10.$$

Il y a donc 10 battements par seconde, ce qui produit un roulement désagréable.

Le triton *fa*-$\underline{si}$ donne les sons suivants :

$$fa_i \quad fa_{i+1} \quad ut_{i+2} \quad fa_{i+2} \quad \underline{la_{i+2}} \quad ut_{i+3} \quad mi\flat_{i+3}(-)$$

$$\underline{si_i} \quad \underline{si_{i+1}} \quad \underline{fa\natural_{i+2}} \quad \underline{si_{i+2}} \quad \underline{\underline{r\acute{e}\natural_{i+3}}}$$

c'est une dissonance assez dure pour les timbres riches en harmoniques.

Battements dus aux sons résultants. — Helmholtz a complété la théorie par l'étude des battements dus aux sons résultants. Nous nous bornerons à indiquer le résultat suivant : « Les premiers différentiels de sons complexes ne donnent jamais de battements qu'en même nombre et dans les mêmes circonstances que les harmoniques des sons considérés, en supposant que leur série soit complète ». En pratique, les résultats trouvés par la considération des harmoniques ne sont pas essentiellement altérés. L'intensité des battements peut seulement être un peu augmentée.

On remarquera que la nécessité de réaliser des consonances conduit à adopter, pour la gamme, précisément les intervalles que nous avons trouvés par les considérations basées sur l'affinité des sons. Cela n'est pas surprenant, puisque dans les deux cas on se base sur les coïncidences et discordances entre harmoniques.

ACCORDS CONSONANTS DE TROIS SONS

Pour qu'un accord de trois sons, et d'une façon générale de plus de deux sons, soit consonant, il faut évidemment que les sons qui le constituent soient deux à deux consonants.

En combinant les 6 consonances de deux sons obtenus précédemment, nous formons les accords

$$(10\text{-}31)\left\{\begin{array}{llllll} 1.-ut\ \underline{mi}\ sol & 3.-ut\ \overline{mi\flat}\ \overline{la\flat} & 5.-ut\ fa\ \underline{la} \\ 2.-ut\ \overline{mi\flat}\ sol & 4.-ut\ \underline{mi}\ \underline{la} & 6.-ut\ fa\ \overline{la\flat} \end{array}\right.$$

Ce sont les seuls accords consonants de trois sons compris dans une octave. On peut s'assurer aisément que *si les notes sont exactement celles qui appartiennent aux gammes majeure et mineure rationnelles,* les sons résultant du premier ordre (les seuls vraiment impor-

tants) c'est-à-dire les sons différentiels des fondamentaux pris deux à deux, n'altèrent pas, par des battements entre eux, la consonance de l'ensemble ; mais dès que les notes sont légèrement faussées, des battements entre ces sons résultants apparaissent (1).

Les accords 1 et 2 sont les accords fondamentaux, ils sont formés de deux tierces superposées, l'une majeure et l'autre mineure et diffèrent par l'ordre dans lequel sont placées ces tierces. Le premier est appelé *accord parfait majeur*, le second *accord parfait mineur*.

Les accords 3 et 4 sont les accords de *sixte et tierce*, enfin 5 et 6 les accords de *sixte et quarte*.

Si l'on forme les deux accords de sixte et tierce respectivement à partir des notes *mi* et *mi ♭* au lieu de *ut*, et les accords de sixte et quarte à partir de *sol*, on voit que ces accords peuvent être considérés comme les renversements d'un accord fondamental majeur ou mineur.

(10-32)

1′ —	*ut mi sol*	contenant	quinte, tierce majeure, tierce mineure
3′ —	*mi sol ut*		quarte, tierce mineure, sixte mineure
5′ —	*sol ut mi*		quarte, tierce majeure, sixte majeure
2′ —	*ut mi♭ sol*		quinte, tierce mineure, tierce majeure
4′ —	*mi♭ sol ut*		quarte, tierce majeure, sixte majeure
6′ —	*sol ut mi♭*		quarte, tierce mineure, sixte mineure

La différence de qualité entre la quarte et la quinte étant moindre que la différence entre la sixte mineure et la sixte majeure ainsi qu'entre les tierces mineure et majeure, on voit que le second renversement *sol ut mi* de l'accord majeur fondamental est plus consonant que cet accord lui-même, mais le premier renversement *mi sol ut* est moins consonant. Pour l'accord mineur, c'est le premier renversement *mi ♭ sol ut* qui donne la meilleure consonance.

La gamme majeure peut être considérée comme engendrée par une suite d'accords parfaits majeurs

fa la ut
ut mi sol
sol si ré ;

et la gamme mineure descendante (10-17) par une suite d'accords parfaits mineurs

fa la♭ ut
ut mi♭ sol
sol si♭ ré

(1) Voir un exemple au paragraphe suivant.

Comparaison de l'accord parfait majeur et de l'accord parfait mineur. — Au point de vue de la tonalité, l'accord parfait majeur *ut mi sol* et ses renversements ne présentent aucune ambiguïté, car *mi* et *sol* peuvent être considérés comme des éléments du son complexe *ut*, alors que ni *mi* ni *sol* ne peuvent jouer le rôle de son principal.

Il en est tout autrement de l'accord mineur, où *ut* et *mi* ♭ ne sont alliés que par l'intermédiaire du *sol*. On peut le considérer comme le son complexe *ut* auquel est ajouté l'élément étranger *mi* ♭, ou comme le son complexe *mi* ♭ auquel est associé l'*ut*. On peut encore l'envisager comme constitué à la manière de l'accord majeur, mais en portant les intervalles de tierce majeure et de tierce mineure au-dessous du son principal, qui serait alors le *sol*. En tout cas, l'*ut* ne s'impose plus comme tonique.

De plus, en se bornant à considérer les sons résultants du premier ordre (donnés par les fondamentaux pris deux à deux), on constate facilement que ces sons différentiels forment un accord majeur de *la* ♭ dans l'accord fondamental (10-32, 2′) et dans l'accord de sixte et tierce (4′). Dans l'accord de sixte et quarte (6′) il s'introduit un *la* ♭ et un *si* ♭. Ces sons résultants n'augmentent pas la dureté (dans le cas 6′ le *la* ♭ et le *si* ♭ ne sont pas dans la même octave), mais ils introduisent des éléments étrangers à l'accord.

Pour toutes ces raisons, l'accord parfait mineur et ses renversements présentent un caractère étrange, qui ne détruit pas la sensation de consonance, mais donne à l'harmonie quelque chose de voilé, de vague.

Accords des divers modes. — Dans chaque mode, on peut former un certain nombre d'accords consonants. On appelle *alliés directs* deux accords ayant une ou plusieurs notes communes.

Voici les accords parfaits, majeurs ou mineurs, alliés directs de l'accord parfait tonique (écrit en majuscules), dans chacun des modes étudiés précédemment (§ 97); nous les obtenons par une série de tierces :

	4 — 5 (au-dessus)
Mode ionien (majeur)	*fa — la — UT — MI — SOL — si — ré*
	1 — 2 — 3 (au-dessous)

	4 — 5 (au-dessus)
Mode éolien (mineur)	*fa — la* ♭ *— UT — MI* ♭ *— SOL — si* ♭ *— ré*
	1 — 2 — 3 (au-dessous)

Mode dorien *fa — la — UT — MI♭ — SOL — si♭ — ré* (4 au-dessus ; 1, 2, 3 au-dessous)

Mode phrygien *ré♭ — fa — la♭ — UT — MI♭ — SOL — si♭* (3, 4 au-dessus ; 1, 2 au-dessous)

Mode mixolydien *fa — la — UT — MI — SOL — si♭ — ré* (4 au-dessus ; 1, 2, 3 au-dessous)

Les séries d'accords les plus complètes, les mieux coordonnées appartiennent au mode majeur et au mode éolien (mode mineur). Aussi ces modes ont-ils obtenu une préférence sur les autres. L'ancien principe, qui permettait de varier les effets au moyen d'un assez grand nombre de modes, s'est renfermé aujourd'hui dans des limites étroites. Les différents degrés d'expression, que les anciens (qui n'admettaient guère que la musique homophone) cherchaient dans la variété des modes, ont été remplacés par la variété des accords et des changements de ton.

La question des changements de ton (modulations) nous conduit à l'étude du tempérament.

TEMPÉRAMENT

Nous avons montré au § 95 à quelle complication conduirait la gamme naturelle si l'on voulait s'en servir dans les instruments tels que l'orgue ou le piano, et conserver en même temps la possibilité de changer de ton : nous avons dit que même en limitant les modulations aux sept notes de la gamme majeure, il faudrait 18 sons à l'octave.

Une nécessité d'ordre pratique pour les instruments à sons fixes a donc conduit (au XVIIe siècle) les musiciens à chercher un tempérament, c'est-à-dire une altération des intervalles naturels. On s'est imposé deux conditions : 1° limiter le nombre des sons à 12 par octave ; 2° obtenir des accords aussi peu durs que possible.

Pour faire la *partition*, ce qui veut dire diviser l'octave en parties, avec un instrument à son fixes, on est obligé de procéder par octaves et par quintes, parce que ce sont les deux intervalles que l'oreille

apprécie le plus exactement. On part d'un son vers le milieu du clavier : supposons que ce soit le *la* normal la_3 ; on prend la quinte mi_4, qu'on abaisse d'une octave à mi_3 ; une nouvelle quinte donne si_3..., etc. ; puis on opère de même en portant des quintes successives vers le bas, en ramenant toujours les sons dans la même octave. Ayant divisé une octave, on accorde aisément les autres.

Mais l'emploi de la quinte juste donnerait la gamme de Pythagore avec des dièzes et bémols distincts : comme on a besoin de confondre ceux-ci, il faut, après avoir réalisé la quinte juste, la fausser un peu. Toute la question est donc de savoir de combien on devra altérer les quintes et s'il y a ou non avantage à les fausser toutes de la même quantité.

Tempérament inégal. — Voici le système qui a d'abord été employé, au XVII[e] siècle.

Supposons qu'on prenne pour son initial un *ut*.

1° Elevons de 4 quintes et abaissons de 2 octaves ; nous obtenons un *mi* ; imposons la condition que ce *mi* soit à la tierce juste de l'*ut* $\left(\text{intervalle } \frac{5}{4}\right)$; nous savons que *mi* est à un comma au-dessous de la note pythagoricienne ; il faut donc, pour l'obtenir, que chacune des 4 quintes soit abaissée d'un quart de comma, c'est-à-dire de 1,35 s. ; ces quintes altérées sont représentées par 174,74 s.

2° Partons maintenant de $\underline{mi}$; élevons encore une fois de 4 quintes et abaissons de 2 octaves ; nous arrivons à un *sol* ♯. D'autre part, revenons à l'*ut*, abaissons de 4 quintes et élevons de 3 octaves ; nous avons un *la* ♭. Il faut faire coïncider le *sol* ♯ et le *la* ♭.

Or, dans la gamme de Pythagore (§ 93), le *sol* est au-dessus du *la* ♭ d'un comma pythagoricien (5,87) à peine supérieur au comma (5,39) ; puisque $\underline{mi}$ est d'un comma au-dessous de la note pythagoricienne, l'opération précédente, si elle était exécutée avec des quintes justes, conduirait à un *sol* ♯ qui ne serait supérieur au *la* ♭ que de la différence entre les deux commas, soit 5,87 — 5,39 = 0,48. Il faut donc, pour confondre le *sol* ♯ et le *la* ♭, répartir ce très petit intervalle entre les 8 quintes utilisées : c'est dire qu'en pratique on prend ici des quintes justes.

Le système de 12 sons obtenus est le suivant, en négligeant les fractions de savart

ut	*ut* ♯	*ré*	*ré* ♯	*mi*	*fa*	*fa* ♯	*sol*	*sol* ♯	*la*	*la* ♯	*si*	*ut*
0	23	49	74	97	125	148	175	199	223	250	273	301
	23	26	25	23	28	23	27	24	24	27	23	28

Ce tempérament est inégal. La suite des intervalles dépend de la note prise pour tonique, de sorte qu'un changement de ton est en même temps un léger changement de mode, ce qui était d'ailleurs considéré comme un avantage par les musiciens du XVIIe siècle. On voit, par exemple, que le ton d'*ut* majeur ne diffère guère de la gamme naturelle, et que le ton de *mi* est très voisin de la gamme à 7 sons de Pythagore.

D'autres systèmes, plus ou moins compliqués, avaient été proposés, mais ils n'avaient pu être employés parce qu'ils ne se prêtaient pas à la « partition » par quintes, indispensable en pratique.

Tempérament égal. — Quel que soit le tempérament adopté, puisqu'on procède par quintes il faut altérer certaines d'entre elles. Or il est facile de voir que, plus on conserve de quintes justes, plus les autres sont faussées.

En effet, si l'on élève un son de 12 quintes justes et qu'on l'abaisse de 7 octaves, on obtient une note située à 5,87 s. au-dessus de la note d'où l'on est parti (intervalle entre *ut* et *si* ♯ dans la gamme de Pythagore) ; pour retrouver la note initiale il faut donc, *en moyenne*, abaisser les quintes de $\frac{5,87}{12}$ ou 0,49 s. Si l'on altère toutes les quintes de cette quantité, elles ne sont que bien peu faussées ; mais si l'on répartit inégalement le comma pythagoricien entre les douzes quintes, certaines d'entre elles sont faussées davantage : dans ces conditions, il est désavantageux de garder quelques quintes justes puisque les autres n'en sont que plus fausses ; de plus le contraste avec les intervalles non altérés rend les quintes fausses encore moins supportables.

La conclusion qui s'impose est que *la seule gamme tempérée admissible est la gamme à tempérament égal* (§ 92), introduite par Bach et préconisée par Rameau.

Pour faire la partition, on prend une note initiale, on accorde la quinte juste et on diminue celle-ci excessivement peu. On procède ainsi de proche en proche. La « preuve » de l'opération est qu'après 12 quintes (les sons étant toujours ramenés dans la même octave), on doit retrouver la note initiale.

Les quintes et les quartes de la gamme tempérée ne sont pas mauvaises, parce qu'elles sont bien peu différentes des intervalles justes et ne donnent que des battements lents. Par exemple, la quinte $ré_3$T. — la_3T. et la quarte la_2T — $ré_3$T donnent 1 battement par seconde, dû aux harmoniques ainsi qu'aux sons résultants. Les battements des quintes tempérées sont assez lents pour que, dans les régions basses ou moyennes, on ne les entende que sur un instru-

ment à sons soutenus (orgue, harmonium) et dans les accords longtemps prolongés, où ils donnent lieu à des fluctuations. Toutefois dans les régions supérieures, l'altération de la quinte est plus fâcheuse, puisqu'à chaque élévation d'octave, la fréquence des battements est doublée. Dans les mélodies, l'altération est encore moins sensible que dans les accords.

C'est surtout pour les autres intervalles, et en particulier pour les tierces majeures et mineures que la gamme tempérée est défectueuse ; ce fait a d'ailleurs été, au début de son emploi, le principal argument contre le tempérament égal. D'abord les battements donnent de la dureté aux tierces tempérées. En second lieu, le son résultant qui serait, pour une tierce majeure juste, la double octave grave du son le plus bas, se trouve pour la tierce tempérée voisin de cette double octave : une suite de tierces, dans les régions aiguës forme, dit Helmholtz, « une sorte de basse fondamentale abominable, qui est d'autant plus désagréable qu'elle est assez voisine de la véritable basse, et sonne comme si elle était exécutée sur un instrument tout à fait faux..... Elle ressort même sur le piano » (1).

Considérons maintenant l'accord parfait, ut_3 mi_3 sol_3 par exemple ; dans la gamme naturelle les fondamentaux de ut_3 mi_3 et ceux de mi_3 sol_3 donnent le même son résultant ut_1 ; dans la gamme tempérée, le son résultant de ut_3 mi_3 est un peu plus haut que ut_1, celui de mi_3 sol_3 un peu plus bas ; il en résulte 6 battements par seconde. Dans l'octave 5, le nombre des battements est quadruplé ce qui donne à l'accord une dureté assez notable.

Helmholtz a fait construire un harmonium qui permet d'obtenir 15 accords majeurs et 15 accords mineurs justes. Avec cet instrument, il a constaté que les accords « présentent, malgré le timbre assez mordant particulier aux instruments à anches, une harmonie très pleine et, pour ainsi dire, surabondante ; ils s'écoulent en courants réguliers, sans donner de tremblements ni de battements. A côté d'eux, les accords tempérés ou pythagoriciens paraissent durs, troublés, tremblotants, irréguliers... La différence entre les accords majeurs et les mineurs, entre les divers renversements, entre les consonances et les dissonances, est beaucoup plus tranchée, beaucoup plus nette que dans la gamme tempérée. Aussi les modulations ont-elles beaucoup plus d'expression qu'à l'ordinaire. On peut apprécier beaucoup de nuances délicates qui, autrement, s'évanouissent d'une

(1) Toutefois, sur le piano, les défauts de la gamme tempérée sont beaucoup moins accusés que sur tout autre instrument à sons fixe, parce que les sons ne sont pas soutenus. On a, de plus, adouci le timbre dans les régions élevées.

manière à peu près complète, notamment celles fournies par les renversements ».

Le tableau qui suit donne la comparaison des intervalles donnés par la gamme naturelle, la gamme tempérée et la gamme de Pythagore.

Intervalles	Naturels	Tempérés	Pythagoriciens
Quinte.	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{885}{886}$	$\frac{3}{2}$
Quarte.	$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{886}{885}$	$\frac{4}{3}$
Tierce majeure . . .	$\frac{5}{4}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{127}{126}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{81}{80}$
Sixte mineure . . .	$\frac{8}{5}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{126}{127}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{80}{81}$
Tierce mineure . . .	$\frac{6}{5}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{121}{122}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{80}{81}$
Sixte majeure . . .	$\frac{5}{3}$	$\frac{5}{3} \cdot \frac{122}{121}$	$\frac{5}{3} \cdot \frac{81}{80}$

Il apparaît nettement que, malgré les défauts que nous avons signalés, la gamme tempérée est encore meilleure que la gamme de Pythagore, où les tierces et les sixtes sont vraiment trop altérées.

Il est cependant des auteurs qui ont voulu ressusciter le système pythagoricien. Leur argument est que, dans la gamme naturelle, le demi-ton majeur qui sépare la sensible de l'octave de la tonique est trop grand, et que dans la gamme tempérée, ce demi-ton n'est pas encore suffisamment réduit. Il est incontestable — nous l'avons déjà dit à la fin du paragraphe 94 — que les musiciens ont tendance, *dans le sens de la résolution*, à élever la sensible au voisinage de la note pythagoricienne.

Mais c'est une erreur de vouloir appuyer le principe de la construction de la gamme sur la position de la sensible, car cette note est précisément celle qui a le moins d'affinité avec la tonique, qui se trouve le moins bien déterminée, et qui peut effectivement occuper des positions variables. Le déplacement de la sensible, note qui joue un rôle tout à fait particulier, n'autorise en rien à rendre les autres

notes tributaires de celle-ci, à modifier les autres intervalles ; l'on ne saurait appliquer au demi-ton qui sépare la tierce majeure de la quarte (intervalles absolument fixés) la diminution qu'on est en droit de faire, et seulement en montant, sur le demi-ton mal défini qui se place à l'extrémité de la gamme majeure.

De l'élévation de la sensible on a voulu déduire que les dièzes sont plus hauts que les bémols, en accord avec le système de Pythagore, et contrairement au système de Zarlin. C'est encore mal comprendre la question : sans doute, si un dièze intervient comme sensible, on peut l'élever et le mettre au-dessus du bémol voisin, mais encore une fois c'est un cas exceptionnel justifié par le rôle de la sensible, et cela n'a rien à voir avec la position des autres dièzes par rapport aux bémols. La discussion ne peut d'ailleurs porter que sur le choix d'une gamme, et *cette gamme une fois fixée ainsi que les conventions concernant les modulations*, les positions des dièzes et des bémols sont absolument déterminées.

DISCUSSION SUR LA « GAMME MÉLODIQUE »

Lorsque des musiciens exercés donnent un accord sur un instrument à sons variables, cet accord est celui qui correspond aux intervalles naturels. C'est un fait que personne ne discute aujourd'hui.

Mais une erreur singulière, que les travaux de Cornu et Mercadier ont beaucoup contribué à répandre, est que la gamme de Pythagore est la véritable « gamme mélodique », par opposition à la gamme harmonique de Zarlin.

Les recherches très précises de Delezenne (1) ont cependant prouvé que les virtuoses de premier ordre jouent mélodiquement suivant les intervalles naturels. Ce savant a répété, sur une corde sonore exactement divisée, chaque note de la gamme majeure telle que l'exécutaient les artistes, et il a constaté que ceux-ci faisaient précisément les tierces et les sixtes dans la gamme naturelle. Helmholtz (2) a vérifié l'exactitude des observations de Delezenne.

Helmholtz, avec l'harmonium dont nous avons parlé plus haut, a comparé la gamme de Pythagore avec la gamme naturelle. « Les passages mélodiques en tierces pythagoriciennes, dit-il, présentent

(1) *Recueil des travaux de la Société des sciences, de l'agriculture et des arts de Lille*, 1826, et 1er semestre 1827. Mémoire sur les valeurs numériques des notes de la gamme.

(2) *Théorie physiologique de la Musique*, chap. XVI.

une dureté, provoquent un sentiment de malaise, qui, avec les tierces naturelles, se changent en une impression d'harmonie, de pureté, de douceur ».

Contrairement à ces résultats, Cornu et Mercadier (1) ont déduit de leurs expériences que les musiciens utilisent la gamme de Pythagore dans l'exécution des mélodies. M. Bouasse (2), dans une remarquable discussion de ces expériences, en a donné la véritable signification.

Les résultats expérimentaux de Cornu et Mercadier prouvent seulement :

1° « Qu'il y a une incertitude notable dans les intervalles fournis *mélodiquement*, *incertitude qui s'élève à un comma*, et dont on peut attribuer une bonne part à la mauvaise définition de la longueur de la corde vibrante et sa non parfaite homogénéité (3) ;

2° Que les sons émis l'un après l'autre sont, par rapport à la tonique, plus *hauts* que ne l'exige la gamme naturelle, sans qu'il soit possible d'affirmer qu'ils appartiennent plutôt à la gamme tempérée qu'à la gamme pythagoricienne » (M. Bouasse).

Ces conclusions ne sont d'ailleurs valables que pour les musiciens sur lesquels Cornu et Mercadier ont expérimenté.

Il n'est pas surprenant que les musiciens — tout au moins ceux qui ne sont pas de grands artistes — aient pris l'habitude d'utiliser la gamme tempérée. Beaucoup d'entre eux se sont accoutumés à ne distinguer que 12 sons à l'octave, et à placer leurs doigts en 12 positions invariables pour chaque octave.

« Le mécanisme du musicien ayant été assoupli pour ce but, dit M. Bouasse, rien d'étonnant qu'il fournisse des intervalles *mélodiques* qui soient plus hauts que les intervalles *naturels*. C'est en particulier ce qu'il fait dans tous les mouvements rapides pour lesquels, si artiste qu'il soit, son instinct n'a pas matériellement le temps de décider quel est le meilleur intervalle parmi les synonymes ; il choisit celui auquel il est le plus accoutumé.

Mais qu'il s'agisse d'accords, le sentiment musical, *s'il est juste*, l'emporte sur l'éducation des muscles, et *après un tâtonnement, d'autant plus court que la représentation préliminaire de l'intervalle musical était plus nette*, le musicien donne l'intervalle naturel. *D'innombrables expériences ont été faites à ce sujet* ; elles con-

(1) *Journal de Physique*, t. 1, p. 113 (1872).

(2) *Revue générale des Sciences*, mars 1906 et les *Bases physiques de la Musique*, p. 97.

(3) Il faut noter aussi que certaines notes essentiellement mélodiques telles que les notes de passage, ornements, trilles... sont par leur nature même, indéterminées. On va jusqu'à utiliser le glissé, c'est-à-dire une succession continue de sons.

duisent toutes aux mêmes conclusions, y compris celles de Cornu et Mercadier. »

En définitive, les conclusions suivantes, telles qu'elles avaient été données par Helmholtz, nous paraissent solidement établies.

1° *Les intervalles théoriques sont parfaitement reconnus par une oreille délicate.*

2° *Les erreurs de la gamme tempérée sont réellement appréciables et désagréables* (1) *pour une oreille juste.*

3° *Malgré le peu de différence des intervalles pris isolément, il est plus facile de chanter juste suivant la gamme naturelle que suivant la gamme tempérée.*

4° *La gamme de Pythagore ne se soutient ni en théorie ni en pratique.*

(1) Ici, Helmholtz nous semble exagérer un peu. Le mot « désagréable » revient presque à dire que l'orgue et le piano sont des instruments faux. Il ne faut pas oublier que Bach et Rameau ont été favorables à l'emploi de la gamme à tempérament égal. Sans doute, il est très regrettable qu'on ne puisse pas utiliser les intervalles justes, mais on a réduit le plus possible, et d'une façon très supportable, les inconvénients du tempérament.



LAVAL. — IMPRIMERIE BARNÉOUD.